



September
2024

Pyrolyse på Samsø

Analyse af sampyrolyse på Samsø

Udarbejdet af:

Ea Energianalyse
Gammeltorv 8, 6 tv.
1457 København K
www.eaea.dk

Udarbejdet for:

Samsø Kommune

Rapporten er medfinansieret af EU gennem LIFE IP programmet samt Region Midtjylland. Indholdet i rapporten afspejler alene forfatterens synspunkter. CINEA, Europa-Kommissionen og Region Midtjylland kan ikke gøres ansvarlig for indholdet.



SAMSØ KOMMUNE
- vi gør det sammen



I SAMARBEJDE MED

midt
regionmidtjylland



Indhold

Indhold	3
1. Sammenfatning	4
Summary (English)	6
2. Indledning	8
3. Ressourceoverblik	9
4. Pyrolyse case	12
Forbehandling	13
Pyrolyse	15
Økonomi forbehandling og pyrolyse	15
Reference cases	20
Pyrolyse cases	25
Referencer i forhold til pyrolyse cases	26
6. Biokul på landbrugsjord	29
7. Drivhusgasemissioner	32
Referencer	34

1. Sammenfatning

Samsø kommune arbejder med at håndtere kommunalt indsamlede affaldsfraktioner samt slam fra det kommunale renselanlæg på den miljømæssigt bedst mulige måde, gerne lokalt på øen. I dag transporteres flere fraktioner til viderebehandling på fastlandet. Kommunen har besluttet at igangsætte en vurdering af muligheden for at etablere et pyrolyseanlæg som alternativ. Formålet med vurderingen er at få en indledende afklaring af miljø (livscyklusperspektiv) samt af økonomi. Det er endvidere formålet, at den indledende analyse kan danne grundlag for efterfølgende konkret teknisk-økonomisk analyse af pyrolyseanlæg.

I denne rapport gennemgås resultaterne af analysen. Det er fundet, at de relevante kommunalt indsamlede fraktioner udgør ca. 1250 ton per år, altså ca. 3,5 ton per dag i gennemsnit. Kommunens omkostning til borttransport og behandling er vurderet til godt 500 kr./ton i gennemsnit. Der er opstillet en reference for at beskrive hvad der sker med fraktionerne, hvis de ikke bliver behandlet i et pyrolyseanlæg. Her bliver kommunalt indsamlet organisk dagrenovation fragtet fra øen og behandlet i biogasanlæg, afvandet slam og haveaffald bliver fragtet fra øen og spredt på landbrugsjord, og træaffald bliver fragtet fra øen til forbrænding.

Der er vurderet tre forskellige muligheder for håndtering ved pyrolyse lokalt. Ved alle tre muligheder anvendes syntesegassen fra processen dels til tørring og dels til produktion af varme. Der produceres biokol som udbringes på landbrugsjord.

Ved mulighed 1 etableres et lille anlæg hvor de forskellige kommunale fraktioner forbehandles og pyrolyseres. Ved mulighed 2 og 3 etableres et større anlæg med iblanding af ca. 6000 ton halm. For mulighed 2 regnes halmen som "overskudshalm" der alternativt nedmuldes. For mulighed 3 skal halmen indløbes kommercielt til en pris på 750 kr./ton leveret. Det er i grundberegningen antaget, at der med

udgangspunkt i "Aftale om et grønt Danmark" kan ydes et tilskud svarende til 30% af investeringen. Det er endvidere antaget, at produktion og udbringning af biokul certificeres, samt at certifikater sælges på det kommercielle marked for klimakreditter til en gennemsnitlig pris på 500 kr./ton CO₂ lagret i et 100 års perspektiv. Det vurderes naturligt, at negative emissioner indgår i det kommunale klimaregnskab.

Anlæg 1 vurderes at udløse negative emissioner på godt 300 ton CO₂e per år, imens anlæg 2 og 3 har negative emissioner på knapt 3500 ton CO₂e per år sammenlignet med referencen, hvoraf størstedelen stammer fra lagring af kulstof i jord. Ved pyrolyse forringes muligheden for recirkulering af kvælstof til jord svarende til 8 t N for anlæg 1 og 23 t N per år for anlæg 2 og 3 sammenlignet med referencen. Beregninger er baseret på spredning af biokul på landbrugsjord, dette forudsætter at grænseværdier for tungmetaller overholdes.

Der har været kontakt til få udbydere af pyrolyseanlæg, og der er kun modtaget retningsgivende investeringsoverslag fra en tysk producent. Økonomianalysen tager bl.a. udgangspunkt i dette overslag samt en række antagelser om driftsomkostninger m.v.

Økonomiberegningerne viser, at et stort anlæg med kommerciel indkøb af halm (Anlæg 3) vil have alt for store omkostninger til at kunne blive rentabelt. Anlæg 1 der kun behandler de kommunalt indsamlede fraktioner har i grundberegningen en behandlingsomkostning på knap 1000 kr./ton. Følsomhedsberegningerne viser, at med lavere (men muligvis realistiske) investerings- og driftsomkostninger og højere pris på klimakreditter, kan Anlæg 2 blive rentabelt. Anlæg 2 modtager 6000 ton halm årligt til en pris der afspejler, at halmen ikke kan afsættes kommercielt. Realismen i en sådan antagelse på Samsø er ikke undersøgt.

Anbefalinger til videre proces:

- **Tungmetaller.** Screeningsanalysen baseret på generelle databaser har vist, at der muligvis er en udfordring med tungmetaller i visse fraktioner. Dette bør relativt hurtigt afklares, fx baseret på stedspecifikke målinger.
- **Klimakreditter.** Værdien af klimakreditter er afgørende for økonomien. Det er muligt, at værdien heraf kan være markant højere end forudsat i grundberegningen. Yderligere markedsafklaring er nødvendig før der kan sandsynliggøres god økonomi.
- **Tilskud til pyrolyse.** Muligheder for at opnå tilskud bør videre vurderes, da det vurderes at være afgørende for økonomien.
- **Forbehandling.** Screeningsanalysen peger på muligt behov for forbehandling uden egentlig analyse af de relevante fraktioner. Der bør tages kontakt til kompetente virksomheder indenfor håndtering af vanskelige bio-fraktioner samt kontakt til producenter af pyrolyseanlæg for en dybere afklaring af indfødnings-specifikationer og dermed nødvendig bestykning af forbehandlingsenheden.
- **Pris pyrolyseanlæg.** Analysen viser, at investerings- og driftsomkostninger skal være lavere end i grundberegningerne for at opnå god økonomi. Dette kan ske gennem en kombination af tilskud, gunstige finansieringsforhold samt lavere pris på selve anlægget. Der bør på forprojekt-niveau tages konkret kontakt til en række potentielle leverandører med henblik på dybere afklaring af pris på relevante anlægsstørrelser.
- **Organisation og halmpris.** Analysen viser, at et anlæg der sam-pyrolyserer de kommunale fraktioner med halm kan være attraktivt, hvis halmen alternativt nedmuldes. Det bør afklares om der er interesse på øens landbrug til at indgå i et partnerskab om et halmbaseret anlæg.
- **Placering og godkendelser.** Der bør i den videre proces, og inden et egentligt forprojekt, screenes for mulige fysiske placeringer, herunder en første vurdering af godkendelsesmæssige forhold.

Summary (English)

Samsø municipality works to handle municipally collected waste fractions and sludge from the municipal wastewater treatment plant in the environmentally best possible way, preferably locally on the island. Today, several fractions are transported off the island for further processing on the mainland. The municipality has decided to initiate an assessment of the possibility of establishing a pyrolysis plant as an alternative. The purpose of the assessment is to obtain an initial clarification of the environmental impact (life cycle perspective) as well as of finances. It is also the purpose that the initial analysis can form the basis for subsequent concrete technical-economic analysis of pyrolysis plants.

This report reviews the results of the analysis. It has been found that the relevant municipally collected fractions amount to approx. 1250 tonnes per year, i.e. approx. 3.5 tonnes per day on average. The municipality's cost for removal and treatment is estimated at just over DKK 500 per tonne. A reference has been set up to describe what happens to the fractions if they are not processed in a pyrolysis plant. Here, municipally collected organic domestic waste is transported from the island and treated in biogas plants, dewatered sludge and garden waste is transported from the island and spread on agricultural land, and wood waste is transported from the island for incineration.

Three different options for handling pyrolysis locally have been evaluated. In all three options, the pyrolysis gas from the process is used partly for drying and partly for heat production. Biochar is produced and applied on agricultural land.

In option 1, a small plant will be established where the various municipal fractions are pre-treated and pyrolyzed. In options 2 and 3, a larger plant is established with a mixture of approx. 6000 tonnes of straw. For option 2, the straw is considered "surplus straw" that is alternatively amended back into the agricultural soil. For option 3, the straw must be brought in commercially at a price of DKK 750/tonne delivered. In the base calculation, it is assumed that a subsidy corresponding to 30% of the investment can be granted based on the "Agreement on a Green Denmark". It is also assumed that the production and application of biochar will be certified, and that certificates will be sold on the commercial market for climate credits at an average price of DKK 500 per tonne of CO₂ stored in a 100-year perspective. It is considered natural that negative emissions are included in the municipal climate accounts.

Plant 1 is estimated to trigger negative emissions of just over 300 tonnes of CO₂e per year, while plants 2 and 3 have negative emissions of just under 3500 tonnes of CO₂e per year compared to the reference, the majority of which originates from the storage of carbon in soil. Pyrolysis reduces the possibility of recirculation of nitrogen to soil corresponding to 8 tonnes N for plant 1 and 23 tonnes N per year for plants 2 and 3 compared to the reference. Calculations are based on the spreading of biochar on agricultural land, this assumes that limit values for heavy metals are observed and complied with.

There have been contacts with few suppliers of pyrolysis plants and only indicative investment estimates have been received from one German producer. The financial analysis is based on this estimate as well as several assumptions about operating costs etc.

The financial calculations show that a large plant with commercial purchase of straw (Plant 3) will have far too high costs to be profitable. Plant 1, which only processes the municipally collected fractions, has a treatment cost of almost DKK 1000 per tonne in the base calculation. The sensitivity calculations show that with lower (but possibly realistic) investment and operating costs and a higher price of climate credits, Plant 2 can become profitable. Plant 2 receives 6000 tonnes of straw annually at a price that reflects the fact that the straw cannot be sold commercially. The realism of such an assumption on Samsø has not been investigated.

Recommendations for further process:

Heavy metals. The screening analysis based on general databases has shown that there may be a challenge with heavy metals in certain fractions. This should be clarified relatively quickly, e.g. based on site-specific measurements.

Carbon credits. The value of climate credits is crucial for the economy. It is possible that the value of this may be significantly higher than assumed in the basic calculation. Further market clarification is necessary before good finances can be made probable.

Pyrolysis subsidies. Opportunities to obtain subsidies should be further assessed, as it is considered to be crucial for the economy.

Preprocessing. The screening analysis points to a possible need for pre-treatment without actual analysis of the relevant fractions. Contact should be made with competent companies in the handling of difficult bio-fractions as well as contact with manufacturers of pyrolysis plants for a deeper clarification of feeding specifications and thus necessary equipment of the pre-treatment unit.

Price of pyrolysis plant. The analysis shows that investment and operating costs must be lower than in the basic calculations to achieve good finances. This can be done through a combination of subsidies, favorable financing conditions and lower prices for the plant itself. At the pre-project level, specific contact should be made with a number of potential suppliers with a view to deeper clarification of the price of relevant plant sizes.

Organization and straw price. The analysis shows that a plant that co-pyrolyzes the municipal fractions with straw can be attractive if the straw is alternatively composted. It should be clarified whether there is interest on the island's agriculture to enter into a partnership on a straw-based plant.

Location and approvals. In the further process, and before an actual pilot project, screening should be carried out for possible physical locations, including an initial assessment of approval conditions.

2. Indledning

Pyrolyse er en termisk nedbrydning af biomasse, der forekommer ved opvarmning i et iltfattigt miljø. Ved pyrolysen dannes biokul og pyrolysegasser. En del af pyrolysegassen kan kondenseres til pyrolyseolie. Processen kan styres, så en væsentlig del af biomassen omdannes til biokul, som kun nedbrydes meget langsomt efter spredning på landbrugsjord. I Danmark er de første større anlæg med såkaldt "langsom pyrolyse" under etablering.

Øen Samsø er en kommune i Region Midtjylland på 114 km² med knap 4000 indbyggere. Det dyrkede areal udgør godt 80 km² (8.000 ha). Samsø er kendt i Danmark som VE ø, og betragter sig som selvforsynende med energi med en vision om at blive fossilfri i 2030.

Samsø Kommune har besluttet at få vurderet muligheden for at sam-pyrolysere visse kommunalt indsamlede reststrømme, primært fra private husholdninger og erhverv. Baggrunden er at Samsø nu sorterer i 10 fraktioner, som hver for sig behandles/køres fra øen til videre behandling. Spørgsmålet er, om det giver mening både i et livscyklus-perspektiv og i et økonomisk perspektiv at nyttiggøre disse fraktioner på øen ved anvendelse af pyrolyseteknologi. Den indledende analyse skal kunne danne grundlag for efterfølgende konkret teknisk-økonomisk analyse af pyrolyseanlæg.





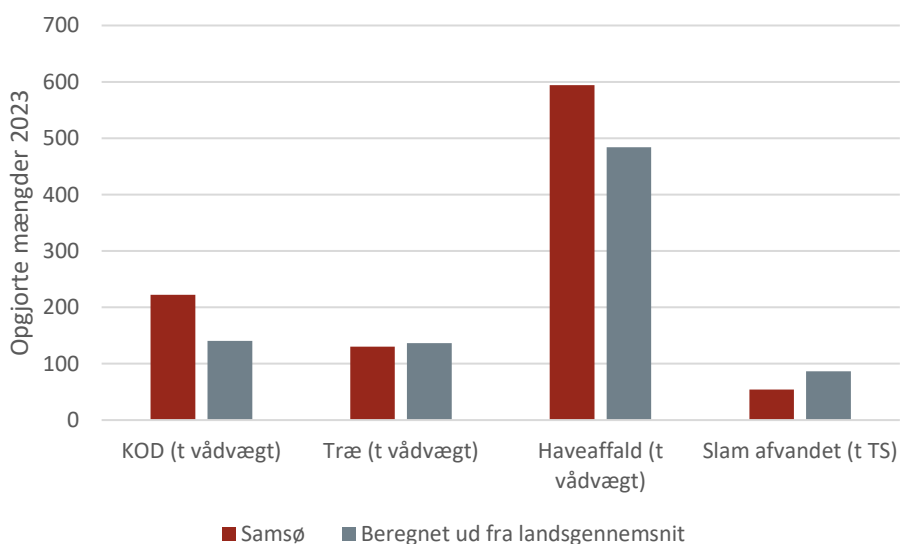
3. Ressourceoverblik

De fraktioner der tænkes indgå i et pyrolyseanlæg er listet i Tabel 1. Her indgår kildesorteret organisk dagrenovation (KOD), træ og haveaffald fra kommunalt indsamlet affald samt afvandet slam fra rensningsanlæg. Data for disse mængder er fra Samsø kommune. Miljøstyrelsens affaldsprognose er brugt for at fremskrive affaldsmængder (Miljøstyrelsen, 2023a). Udover disse fraktioner kan halm tilføjes for at balancere input til pyrolysen og forbedre brændelsegenskaberne i det samlede input.

I Figur 1 sammenlignes de indsamlede affaldsmængder med de forventede mængder på baggrund af befolkningstallet i Samsø kommune. For KOD ligger mængderne over det forventede, dette kan forklares med den store turisme på Samsø. Derimod ligger slam under de forventede mængder hvilket kan være på grund af begrænsede mængder industrislam på Samsø. De relativt store mængder haveaffald på Samsø kan forklares ved boligsammensætningen på Samsø med lav andel etagebyggeri i forhold til landsgennemsnittet.

Fraktion	Årlige mængder (ton vådvægt)		Behandling 2028-2048	
	Nuværende	2028-2048	Reference	Alternativ
KOD	222	222	Biogas	Pyrolyse
Træ	130	146	Forbrænding	
Haveaffald	594	598	Spredning på landbrugsjord	
Slam	270	270	Spredning på landbrugsjord	
Halm	6000	6000	Nedmuldning	

Tabel 1: Overblik over årlige mængder input til pyrolyseanlæg, og reference case for behandling.



Figur 1: Overblik over indsamlede affaldsmængder sammenlignet med landsgennemsnit

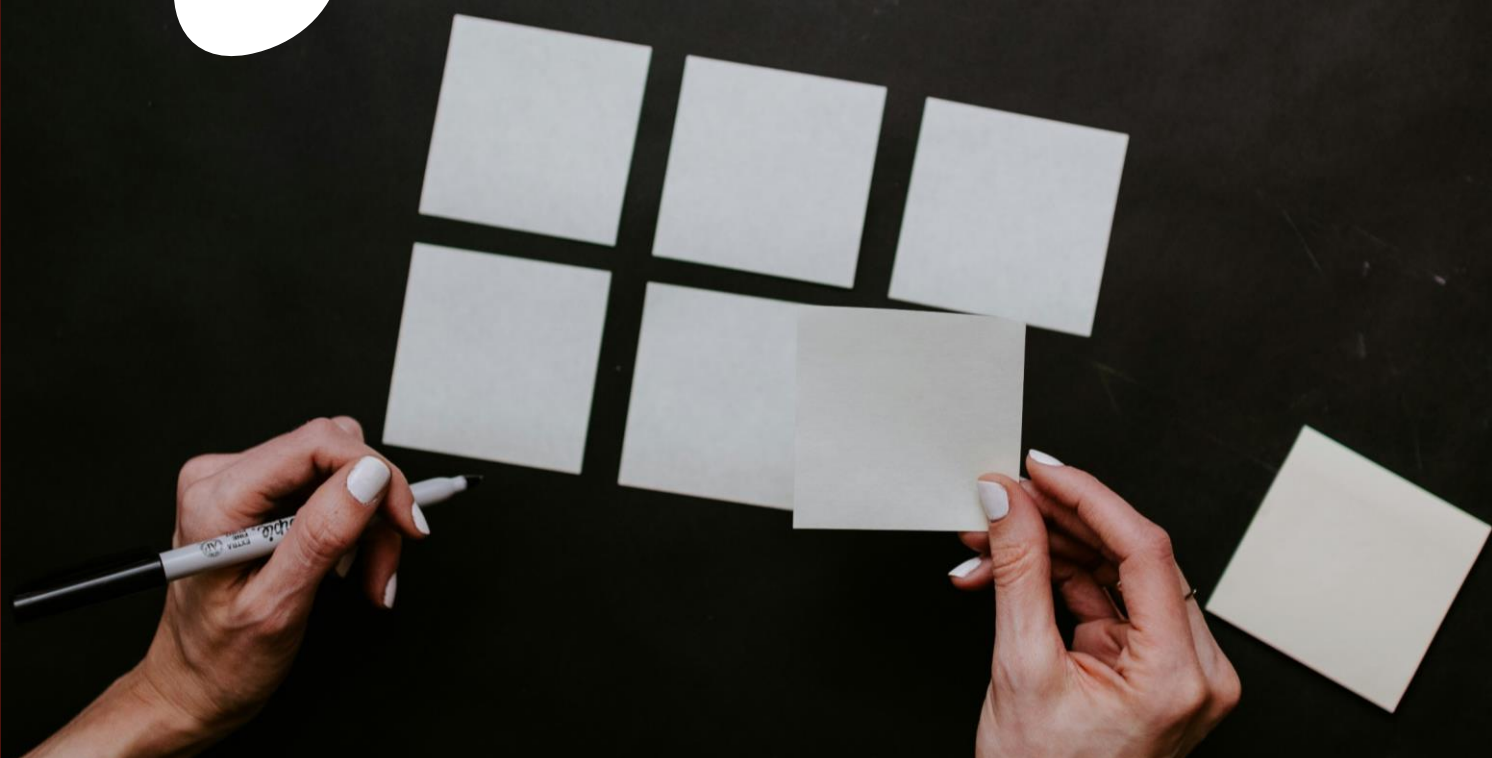
Udover de kommunalt indsamlede mængder er der mulighed for at bruge halm som input til pyrolyse.

Kommentarer fra Henrik Øster Samsø Landbrugsforening:

- Der leveres årligt cirka 6000 t halm til afbrænding på fjernvarmeværker på Samsø. Herudover ca. 1000 t halm til Brattingsborg Gods.

- *Den halm der ikke bjerges bliver nedmuldet.*
- *Der er mulighed for at bjerge mere halm. Mængderne er noget usikre, men 5000-6000 tons årligt er ikke utænkeligt.*
 - *Hvis der fremover er lavere forbrug af halm til fjernvarme vil det kunne indregnes som ressource til et pyrolyseanlæg.*
 - *Mængder af halm kommer an på hvordan produktionen udvikler sig i landbruget. Mængden reduceres hvis der for eksempel skal dyrkes mere grøntsager.*
- *Prisen på halm forventes stigende på grund af stigende efterspørgsel. En pris på 700-750 kr/t høstet halm vurderes ikke urealistisk.*

4



4. Pyrolyse case

Analysen vedrør et pyrolyseanlæg med tænkt første driftsår i 2028, første fulde driftsår i 2029. Valget af pyrolyseteknologi bedømmes på baggrund af flere faktorer, herunder tilgængelige ressourcer, ønsket output samt dets anvendelse. I dette projekt, hvor ressourcerne består af en blanding af forskellige fraktioner, anses langsom pyrolyse ved temperaturer mellem 450-600°C for at være det mest hensigtsmæssige valg. Det primære mål er produktion af biokul, der anvendes til lagring af CO₂e, og som skal kunne opbevare dette over så lang tid som muligt. For at opnå et større udbytte af biokul er langsom pyrolyse og lavere temperaturer den foretrukne metode, da det resulterer i en højere andel af biokul. Langsom pyrolyse er en veludviklet teknologi til produktion af biokul.

Kommunalt indsamlede mængder bruges som udgangspunkt. Disse mængder er dog begrænsede til cirka 1237 t vådvægt/år med et vægtet tørstofindhold på 55%, der er derfor brug for tørring af de kommunalt indsamlede mængder, da tørstofindholdet ifølge forskellige producenter af pyrolyseanlæg bør være $\geq 80\%$. Der skitseres to forskellige anlæg. Det ene der udelukkende består af kommunalt indsamlede reststrømme, hvilke er tørring og neddeling, og det andet hvor der også tilføres betydelige mængder halm. Vi antager dog, at der stadig er behov for tørring og neddeling af de kommunale fraktioner. Endvidere antages det, at også halmen skal finsnittede, hvorefter det hele opblandes og kan lagres i åben lade med fast bund. Det kan være muligt at reducere tørring af slam og KOD, såfremt der tilføres meget tør halm. Denne mulighed er dog ikke indregnet i økonomien.

Der er regnet på to cases for halmtilførsel: I den ene case tilføres kun halm der alternativt ville blive nedmuldet. I denne case betaler pyrolyseanlægget 150 kr./ton i omkostninger for indsamling og transport af halm. I den anden case købes halmen til en markedspris på 750 kr./ton (alternativ salgspris).

Udbyttet af biokul er omvendt korreleret med temperaturen; det falder, i takt med at temperaturen øges (Energistyrelsen, 2024a). Temperaturen påvirker dog også biokullets stabilitet, idet højere temperaturer resulterer i et mere stabilt biokul, hvilket indebærer, at det kan opbevare kulstof i længere tid (Woolf et al., 2021). Derfor opstår der en afvejning mellem stabilitet og mængden af biokul. Af denne årsag foretrækkes langsom pyrolyse ved temperaturer omkring 500-550°C (Rodrigues, et al., 2023).

	Kommunal sam-pyrolyse		Halmbaseret anlæg	
	t vådvægt	t TS	t vådvægt	t TS
KOD	222	129	222	129
Træ	146	132	146	132
Slam afvandet	270	54	270	54
Haveaffald	598	365	598	365
Halm	-	-	6.000	5.100

Tabel 2: Overblik over årligt input mix ved to forskellige pyrolyseanlæg.

		Kommunal sam-pyrolyse	Halmbaseret anlæg
Input	t vådvægt	1.237	7.237
	t TS	680	5.780
Kulstof	t C	228	2.531
Energi	GJ	8.825	94.686

Tabel 3: Samlet årligt input i de to forskellige pyrolyseanlæg.

Der er i analyserne regnet med en samlet energieffektivitet på 90% ekskl. forbehandling. Biomassens energiindhold ender dels som brændværdi i syntesegas (ca. 30%) og dels som brændværdi i biokul (ca. 60%). Ved beregning af denne fordeling er det antaget at ca. 50% af kulstoffet i inputmaterialet ender i biokul med en brændværdi på ca. 23 GJ/ton.

Forbehandling

Det antages, at KOD og træ skal neddeles, samt at KOD og slam tørres. Det antages endvidere, at halm skal neddeles. Det antages ikke umiddelbart nødvendigt med yderligere sortering af KOD. Følgende principper antages anvendt:

KOD: Macerering, opblanding, tørring

Slam: tørring, opblanding

Haveaffald: Flisning, tørring, opblanding

Træ: Flisning, evt. ved hammermølle, opblanding

Halm: Neddeling, evt. ved hammermølle, biogrinder, opblanding.

Det antages at forbehandling og opblanding af biomassen køres i kampagner indenfor normal arbejdstid, imens drift af selve pyrolyseanlægget kører kontinuert. Der er ikke indhentet tilbud på forbehandlingsudstyr. Investeringsoverslag ses i Tabel 5.

	Lille anlæg	Større anlæg	
KOD	222	222	t/år
Træ	146	146	t/år
Slam afvandet	270	270	t/år
Haveaffald	598	598	t/år
Halm		6000	t/år
I alt:	1236	7236	t/år
kg/time	1236	7236	
Macerator	222	222	kg/h
Hammermølle	744	6.744	kg/h
Tørrer	1.090	1.090	kg/h
opblander	1.236	7.236	kg/h

Tabel 4: Biomasseinput og forbehandling to anlægsstørrelser. Ved dimensionering af forbehandling antages 1000 driftstimer/år.

	mio kr	mio kr	år	1000 kr/år	1000kr/år	Capex + opex	Capex + opex
	Inv-lille	Inv-stor	levetid	Capex- lille	Capex- stor	Kr/ton lille	Kr/ton stor
Macerator	0,3	0,3	7,5	49	49	44	8
Hammer- mølle	1	2,5	7,5	163	408	148	63
Tørrer	0,7	0,7	15	67	67	66	11
opblander	0,3	0,5	15	29	48	28	8
I alt:	2,3	4		308	572	287	90

Tabel 5: Capex for forbehandling to anlægsstørrelser. Ved dimensionering af forbehandling antages 1000 driftstimer/år.

Det ses i Tabel 5, at omkostningerne til forbehandling udgør 287 kr./ton input for det lille anlæg og 90 kr./ton input for det store anlæg. Hertil kommer forbrug af el og damp. Det antages overslagsmæssigt, at energibehov til damp udgør 2 * fordampningsvarmen, i alt 2500 GJ/år. Det lægges til grund, at tørreanlægget drives af 70% pyrolysegas og 30% el (lille anlæg) og 100% pyrolysegas for det store anlæg. At der anvendes el på det lille anlæg skyldes, at der kan være udfordringer med samtidighed mellem gasproduktion (kontinuert) og energibehov til tørring (kampagnekørsel). Der anvendes således 1750 GJ pyrolysegas og 750 GJ el (208 MWh) på det lille anlæg. Det forudsættes, at macerator og hammermølle hver har et el-forbrug på 25 kWh/ton behandlet.

Der er indregnet overdækket hal i CAPEX for selve pyrolyseanlægget. Det forudsættes at der for en mindre merinvestering gøres plads til forbehandlingsanlæg. Merinvestering forudsættes indeholdt i CAPEX for forbehandling.

Pyrolyse

Til vurdering af pyrolyseteknologi er der taget udgangspunkt i litteraturstudie, og der er taget kontakt til en række mulige danske og udenlandske leverandører. Til den økonomiske vurdering tages der udgangspunkt i overslag modtaget fra den tyske leverandør Biomacon. Et C400 anlæg (400 kW indfyret) tilbydes til godt 500.000 €, og vurderes af leverandøren at koste ca. 1,5 mio € færdiginstalleret. Leverandøren opgiver en kapacitet på 1900 ton træflis pr. år (20% vandindhold). Det er valgt at tage udgangspunkt i Biomacon såvel for den lille og for den store anlægsconfiguration. Der antages en skalafordel på ca. 20% ved hver fordobling af anlægsstørrelsen. Grundlæggende forudsætninger listes i Tabel 6.

	Lille anlæg	Større anlæg	
Årlig biomasse, 85% fugt:	800	6800	Ton
Driftstimer:	7500	7500	Timer
Energi:	11,0	13,9	GJ/ton
Biokul:	0,29	0,37	Ton/ton input
Gas:	31%	29%	Af energiinput
Termisk effekt:	327	3507	kW
Investering:	11,2	52,3	Mio kr.
Drift:	5%	4%	Af inv.
Gas til tørring:	Ja	Ja	
Gas til fjernvarme	Ja	Ja	

Tabel 6: Pyrolyse grundforudsætninger.

Økonomi forbehandling og pyrolyse

Der er gennemført simple økonomiberegninger. Ifølge afrapportering fra den grønne trepart (Aftale om et grønt Danmark) etableres der en pulje til lagring af biokul frembragt ved pyrolyse til en værdi af i alt ca. 10 mia. kr. Ifølge aftalen gives tilskuddet til biokul der lagres i landbrugsjord. Det er stadig uklart hvordan puljen konkret udmøntes. I denne rapport er effekten af puljen regnet som et anlægstilskud til en værdi af 30% af investeringen. , hvilket svarer til 400 – 1000 kr./ton CO₂ lagret, afhængig af anlægsconfiguration. Endvidere forudsættes det, at biokul kan certificeres og sælges i markedet for CO₂ kreditter til en pris af 500 kr./ton lagret CO₂. Kreditmarkedet er stadig relativt ungt, og prisudviklingen er usikker. Det forudsættes endvidere, at el kan købes til 750 kr./MWh inklusive tariffer, samt at overskudsvarme kan sælges til 50 kr./GJ. For det store anlæg er økonomien gennemregnet under to antagelser: Enten skal halmen alternativt nedmuldes, eller også kan halmen alternativt sælges til 750 kr./ton.

De nuværende omkostninger for transport og behandling i reference cases for forskellige fraktioner er listet i Tabel 7. For de kommunalt indsamlede fraktioner svarer dette til en vægtet pris på 515 kr./ton vådvægt eller 938 kr./ton TS.

	KOD	Træ	Haveaffald	Slam afvandet	Halm-nedmuldet	Halm-solgt
kr./t vådvægt	384	614	490	625	150	750
TS %	58%	90%	61%	20%	85%	85%
kr./t TS	661	683	804	3125	176	882

Tabel 7: Overblik over omkostninger brugt i referencecasen for transport og behandling af forskellige fraktioner fra Samsø Kommune.

I pyrolysecasen bruges der større mængder kunstgødning, da der ikke er det samme mulighed for at recirkulere kvælstof. Dette betyder en øget omkostning til kunstgødning, med en pris på 5 kr./kg N svarer dette til 55 kr./ton TS for det kommunale sam-pyrolyseanlæg og 18 kr./ton TS input for det halmbaserede anlæg. Der er ikke differentieret mellem lokation for brug af kvælstof for de forskellige fraktioner.

	1: Kun kommunalt	2: Inkl. halm der alternativt nedmuldes	3: Inkl. halm der alternativt sælges	
Capex:	0,90	4,19	4,19	Mio kr.
Opex:	0,56	2,09	2,09	Mio kr.
Forbehandling:	0,05	0,08	0,08	Mio kr.
El forbehandling:	0,17	0,13	0,13	Mio kr.
Halm:	0	0,90	4,50	Mio kr.
Udg. i alt:	1,67	7,39	10,99	Mio kr.
Varmesalg:	0,05	1,23	1,23	Mio kr.
Certifikater:	0,13	1,69	1,69	Mio kr.
Værdi af tilskud:	0,27	1,26	1,26	Mio kr.
Indt. i alt:	0,44	4,17	4,17	Mio kr.
Udg. – Indt.	1,23	3,22	6,82	Mio kr.
Kr./ton	994	445	943	Kr./ton
Kr./ton kommunalt:	994	2.606	5.518	Kr./ton

Tabel 8: Forbehandling og pyrolyse økonomi.

Den samlede økonomi for anlæg til forbehandling og pyrolyse ses i Tabel 8. For selve pyrolyseanlægget er der regnet med 20 års levetid, og investering med udgangspunkt i oplysninger fra den tyske leverandør Biomacon. Det ses, at investeringsomkostninger for selve pyrolyseanlægget (capex) udgør godt 50% af de samlede omkostninger for det lille anlæg, og for det store anlæg når halmen alternativt nedmuldes (lav omkostning til halm). Capex er beregnet med 5% realrente svarende til en WACC¹ på ca. 7%, og en levetid på 20 år.

For det lille anlæg anvendes en stor del af gassen til produktion af overhedet damp til tørring af KOD, ha-veaffald og slam. Det antages, at anlægget (stort eller lille) placeres på en lokation hvor det er muligt i et vist omfang at afsætte overskudsvarme. Såfremt det vurderes muligt, er det sandsynligt at anlægget kan yderligere energioptimeres.

Målt i kr. per ton kommunalt tilførte fraktioner, leverer det lille anlæg den bedste økonomi, med en omkostning på knap 1000 kr./ton kommunalt indsamlet (inkl. evt. tilskud fra pulje til lagring af biokul frembragt ved pyrolyse). Det kan udledes fra Tabel 7 at omkostningerne i referencen udgør ca. 500 kr./ton kommunalt affald før tørring. Pyrolyse på Samsø vil hermed i beregningen koste ca. det dobbelte.

Der er gennemført følsomhedsberegninger på økonomien for værdien af klimakreditter, investeringsbehov (CAPEX) samt driftsomkostninger (OPEX). Følsomhedsanalyser ses i Tabel 9.

¹ Weighted Average Cost of Capital = gennemsnit af indskudskapital og lånekapital.

	1: Kun kommunalt	2: Inkl. halm der alternativt nedmuldes	3: Inkl. Halm der alternativt sælges	
Reference:	994	2.606	5.518	kr./ton
a) klimakredit 1000 kr./ton	892	1.240	4.153	kr./ton
b) 30% lavere CAPEX	842	1.893	4.806	kr./ton
c) 30% lavere opex	858	2.098	5.011	kr./ton
d) a+b+c	604	20	2.933	kr./ton

Tabel 9: Følsomhedsberegninger. Samlede nettoomkostninger per ton kommunalt indsamlet

Først når forudsætningerne flytter sig markant fra udgangspunktet, ses det at behandlingsomkostningerne ved pyrolyse er økonomisk mere favorabelt end referencen som er borttransport fra øen.

Hvis værdien af certifikater kan prissættes til 1000 kr/ton, hvis CAPEX kan reduceres yderligere 30% gennem besparelser eller yderligere tilskud, samt hvis OPEX kan reduceres med 30%, så er pyrolyse på det lille anlæg omkostningsmæssigt sammenligneligt med referencen. Det er interessant, at for et anlæg der primært pyrolyserer halm som alternativt ville være nedmuldet, bliver økonomien med de mest gunstige forudsætninger faktisk positiv.

Det antages i alle tilfælde, at produktion (og udbringning) af biokul udløser salg af certifikater. Værdien af certifikater har stor betydning for økonomien, især når der tilføres halm. Ved en certifikatværdi på 1250 kr/ton CO₂ bliver økonomien positiv for anlæg 2 uden ændring af forudsætninger i øvrigt. Ved en certifikatværdi på 1000 kr./ton, kan økonomien blive positiv for anlæg 2. såfremt der samtidig opnås ca. 30% besparelser på OPEX og CAPEX.

Det skal understreges at økonomiberegningerne i vidt omfang er overslagsberegninger der i betydeligt omfang er baseret på usikre informationer og antagelser.

5. Klimaeffekter og udnyttelse af næringsstoffer

De forskellige pyrolysecases stilles op imod relevante referencer af de pågældende input mix, hvor formålet er at se på forskel mellem at lade biomasse ressourcer blive på øen til pyrolyse på Samsø fremfor at transportere dem til videre behandling i referencerne. Reference cases er opstillet for at kunne vurdere effekter ved brug af biomasse til pyrolyse på Samsø i forhold til en reference, der illustrerer, hvad der ellers ville ske med biomassen.

I denne kvantificering af miljø og klima effekter beregnes klimaeffekter med et livscyklusperspektiv samt udnyttelse af næringsstoffer. Klimaeffekter kvantificeres med et 100-årigt perspektiv. En vurdering af klimaeffekter over en årrække ligger udenfor analysen. Dette kræver, blandt andet, en sammenligning af henfaldskurver for kulstof i reference og pyrolysecases. Som baggrund til dette er der brug for modellering af nedbrydning for kulstof for de forskellige fraktioner samt det samlede for det specifikke input mix der indgår i pyrolysen. Dette er noget som der lige nu arbejdes med på flere danske og udenlandske universiteter, og resultaterne har endnu ikke en robusthed der gør det aktuelt at inkludere i denne type analyse.

For drivhusgasser inkluderes kuldioxid (CO_2), metan (CH_4) samt lattergas (N_2O). Disse normaliseres til CO_2 -ækvivalenter (CO_2e) med de faktorer der er listede i Tabel 10. Biogent CO_2 anses for værende neutralt, da den biomasse der er inkluderet i analysen, er begrænset til reststrømme. Derfor kvantificeres lagring af biogent CO_2 udover systemets 100 års afgrænsning med -1.

	GWP100	GWP20
CO ₂ (bio)	0	0
CO ₂ (fossil)	1	1
CH ₄ (bio)	27	80
CH ₄ (fossil)	29,8	83
N ₂ O	273	273

Tabel 10: Brugte faktorer for normalisering af drivhusgasser til CO₂e (IPCC, 2021)

Lagring af biogent kulstof på tværs af de forskellige reststrømme, både for referencen og for pyrolyse er centrale forudsætninger, forbundet med stor usikkerhed. I kvantificering af lagret kulstof er data kombineret fra forskellige studier, med varierende metoder til udregning af kulstofslagring, på grund af manglende overlap på tværs af kilder. De brugte værdier er listede i Tabel 11. For biokul fra pyrolyse er de samme tal brugt for begge pyrolysecases. Her antages det at halvdelen af kulstoffet ender i biokul og at 80% af dette er stabilt lagret efter 100år.

	KOD	Slam	Have- affald	Halm	Biokul
Lagret kulstof efter 100 år (kg C lagret/kg C input)	8%	6%	18%	3%	80%
Kilde	Andersen et al., 2024	Bruun et al., 2016	ten Have et al., 2019	Andersen et al., 2024	Andersen et al., 2024

Tabel 11: Brugte værdier for andel kulstof lagret i jord efter 100 år.

I forhold til udnyttelse af næringsstoffer regnes der ikke til at være nogen forskel i forhold til fosfor og kalium mellem de opstillede cases, men derimod for kvælstof. Derfor er udnyttelse af næringsstoffer begrænset til brug af kvælstof. Udnyttelsesfaktorer for de forskellige fraktioner er listede i Tabel 12, med et vægtet gennemsnit for det kommunale sam-pyrolyse anlæg på 45% og på 42% for det halmbaserede anlæg.

	KOD	Slam	Haveaffald	Halm	Biokul
Kvælstof udnyttelsesfaktor	75%	50%	0%	40%	0%

Tabel 12: Udnyttelsesfaktorer for kvælstof fra forskellige fraktioner samt vægtet gennemsnit for reference case (Gødskningsbekendtgørelsen, 2023; Miljøstyrelsen, 2019). Træ er ikke inkluderet da kvælstof ikke bliver udnyttet i referencen.

For N₂O emissioner ved kvælstofgødning kvantificeres direkte emissioner som 1% N til N₂O-N for både organisk gødning, eller recirkulering af kvælstof, og for kunstgødning (IPCC, 2019). Det antages at der bliver gødsket op til det maksimalt tilladte. Det medfører at der udbringes en større mængde kvælstof på arealer hvor der gødskes med organisk gødning, eller biokul, med udnyttelsesprocent under 100%. Da der benyttes en generel IPCC tier 1 faktor til omdannelse af N til N₂O-N på 1% i alle tilfælde, så bliver resultatet at anvendelse af organisk gødning og biokul fører til øget udledning af N₂O. Kvælstof der bliver recirkuleret, med de andele specificeret i Tabel 12, kvantificeres som undgået kunstgødning og kvantificeres med en emissionsfaktor der repræsenterer emissioner forbundet med produktion af marginal kvælstofgødning svarende til 4,97 kg CO₂e/ kg N (Symeonidis, 2016). Ændringer i kvælstofdynamik påvirker også emissioner af ammoniak og nitrat som også kan medføre ændringer i lattergasemissioner. Dette er ikke inkluderet i dette studie, hvilket bidrager til en konservativ klimaeffektsvurdering.

Da analysen vedrør et anlæg med første driftsår i 2028 og første fulde driftsår i 2029 forventes den danske el og fjernvarme sektor værende CO₂-neutral (Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, 2024). Derfor

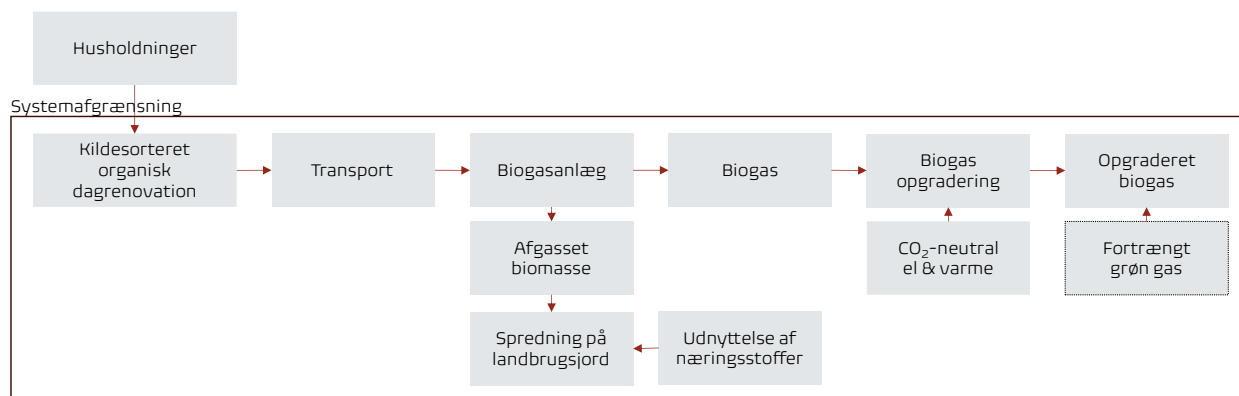
kvantificeres ikke forskel i CO₂ emissioner relateret til marginal el og fjernvarme forbrug og produktion. Ligeledes for opgraderet biogas, forventes gas i det danske ledningsnetværk være grønt før 2029 (Energistyrelsen, 2023). Derfor antages det at opgraderet biogas fortrænger andet grøn gas i det danske gasledningsnetværk.

Reference cases

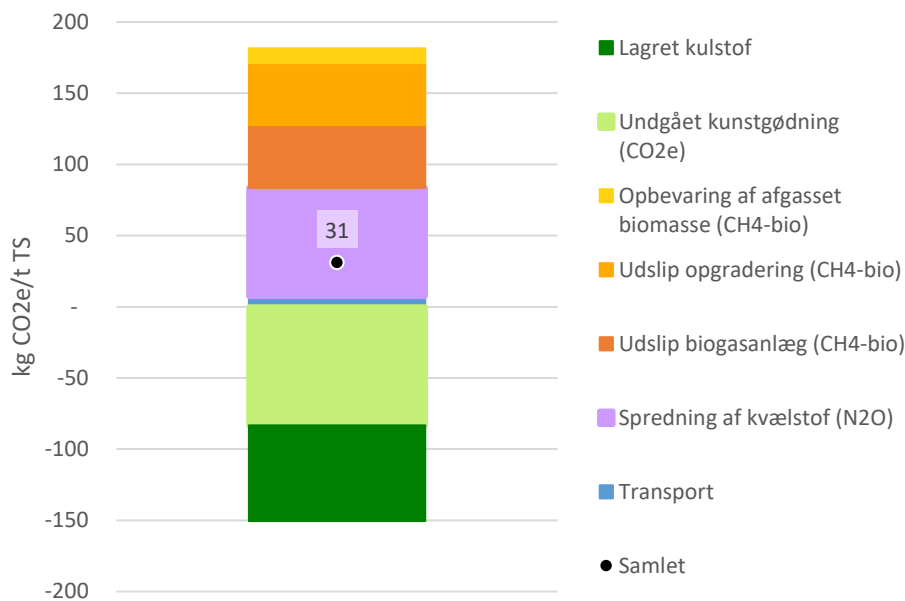
Der opstilles en reference for hver af de fraktioner der indgår som input til pyrolysen, listede i Tabel 2, for at vurdere relevansen for de to pyrolysecases. Formålet er at se på forskellen mellem behandling af de samme fraktioner der behandles i pyrolysen. Ved pyrolyse sker behandlingen på Samsø, hvor referencecasen til stor del reflekterer en situation hvor behandling er udenfor øen. Som udgangspunkt er der i reference brugt afstand på 20 km færge og 45 km lastbil per vej. Transport fylder dog meget lidt i klimaregnskabet for behandling af reststrømme fra Samsø. I denne analyse bruges en CO₂ emissionsfaktor for dieselfærge (Griffin People ApS, 2019) og fremskrivning af emissioner fra lastbil (Energistyrelsen, 2020). Klimaintensitet vedrørende transport i forbindelse med markarbejde er ikke kvantificeret, da dette antages at have en marginal effekt. Herunder specificeres de definerede referencer for de forskellige fraktioner.

Kildesortret organisk dagrenovation

Denne fraktion består primært af madaffald fra husholdninger der i referencecasen bliver behandlet i et biogasanlæg og den producerede biogas bliver opgraderet med input af CO₂-neutral el og varme. Den opgraderede biogas fortrænger grøn gas i det danske gasnet, hvilket – sammen med de estimerede metanudslip fra biogasanlægget og opgraderingsanlægget, er blandt de mest centrale forudsætninger i referencen for KOD.



Figur 2: Skitse af referencecase for kildesorteret organisk dagrenovation (KOD).

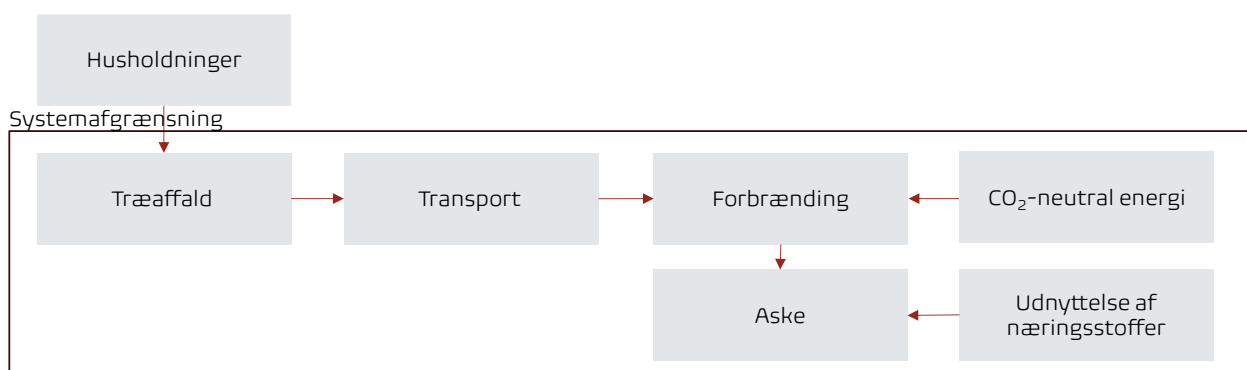


Figur 3: Overblik over drivhusgasemissioner fra referencecasen for kildesorteret organisk dagrenovation opgjort i CO₂e per tons tørstof.

Metanudslip for biogasanlæg er sat til 1%, svarende til målsætningen fra både biogasbranchen og Klimarådet (Klimarådet, 2024; Biogas Danmark, 2024). For opgradering af biogas er der et forventet udslip på 1%, svarende til gældende lovkraft (Bæredygtighedsbekendtgørelsen, 2024). Ifølge teknologikataloget bør udslip fra nye opgraderingsanlæg være reducerede til 0,1% (Energistyrelsen, 2024a), men nuværende niveauer er på 7% (Biogas Danmark, 2024), derfor er 1% fra de gældende lovkraft brugt i analysen. Var der anvendt en antagelse for fortrængt energi, hvor opgraderet biogas fortrænger naturgas, ville dette have en væsentlig betydning for den samlede klimagevinst, da der regnes med en produktion af 8,6 GJ opgraderet biogas/t TS og med en klimaintensitet for naturgas på 57 kg CO₂e/GJ (Energistyrelsen, 2024b). Dermed ville fortrængt naturgas bidrage med væsentlige negative emissioner.

Træ

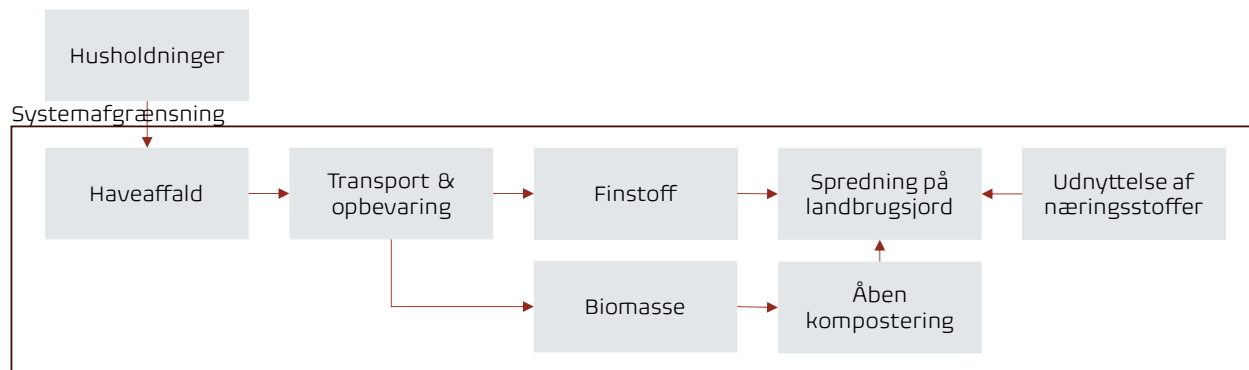
Træfraktionen består af ubehandlet træaffald, primært indsamlet fra husholdninger, på kommunens genbrugsplads. I referencecasen bliver træet sendt til forbrænding, her kan næringsstofferne fosfor og kalium fra asken udnyttes til gødning. Da forbrændingen af træ regnes med at fortrænge CO₂-neutral energi er udslip fra træreferencecasen begrænsede til transport, svarende til 5 kg CO₂e/t tørstof.



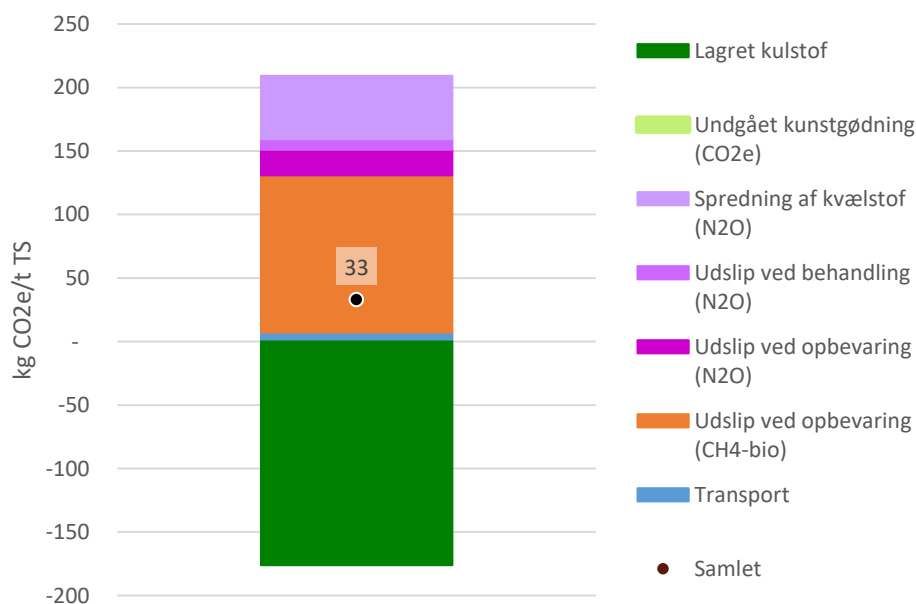
Figur 4: Skitse af referencecase for træ.

Haveaffald

Haveaffald stammer fra den kommunale genbrugsplads og er primært indsamlet fra husholdninger. Generelt består tre fjerdedele af haveaffaldet af finstof (jord, blade, græs, mindre grene, mm.) og resten af grovere biomasse (grene og grovere stykker træ). Finstoffet har en høj andel af både aske og næringsstoffer, der kan spredes direkte på landbrugsjord (Miljøstyrelsen, 2023b).. Derimod findes to tredjedele af kulstof i haveaffaldets grovere biomassefraktion. I referencecasen bliver haveaffald transporteret væk fra Samsø, opbevaret og derefter og spredt på landbrugsjord.



Figur 5: Skitse af referencecase for haveaffald.

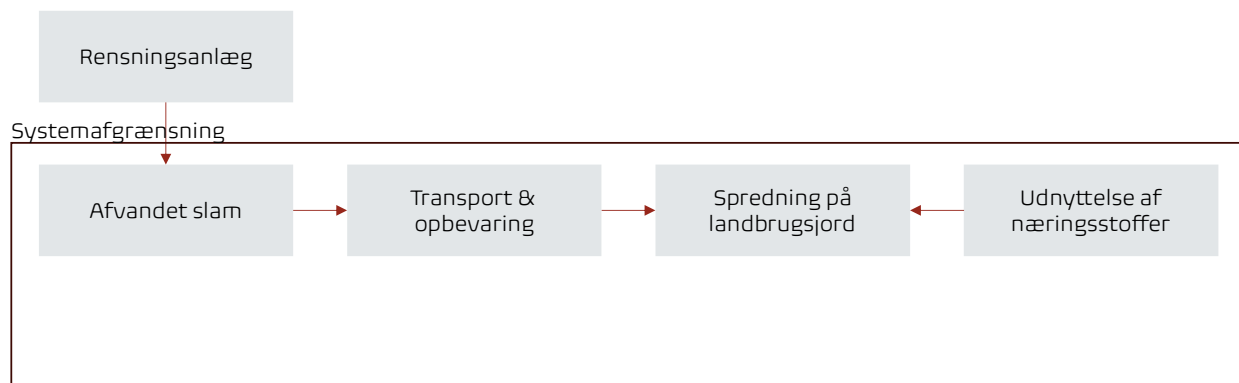


Figur 6: Overblik over drivhusgasemissioner fra referencecasen for haveaffald opgjort i CO₂e per tons tørstof.

I referencecasen for haveaffald genereres både metan og lattergasemissioner ved oplagring af haveaffald samt lattergas ved spredning af haveaffaldet hvor der antages en liggetid på 9,5 måned (Miljøstyrelsen, 2023c). Disse emissioner bliver til dels opvejet af kulstof lagret i jord (ten Hoeve et al., 2019). Kvælstof i haveaffald har en udnyttelsesfaktor i landmandens kvælstofregnskab på nul hvorfor der ikke er en klimaeffekt fra undgået kunstgødning, men stadig en emission fra anvendelse.

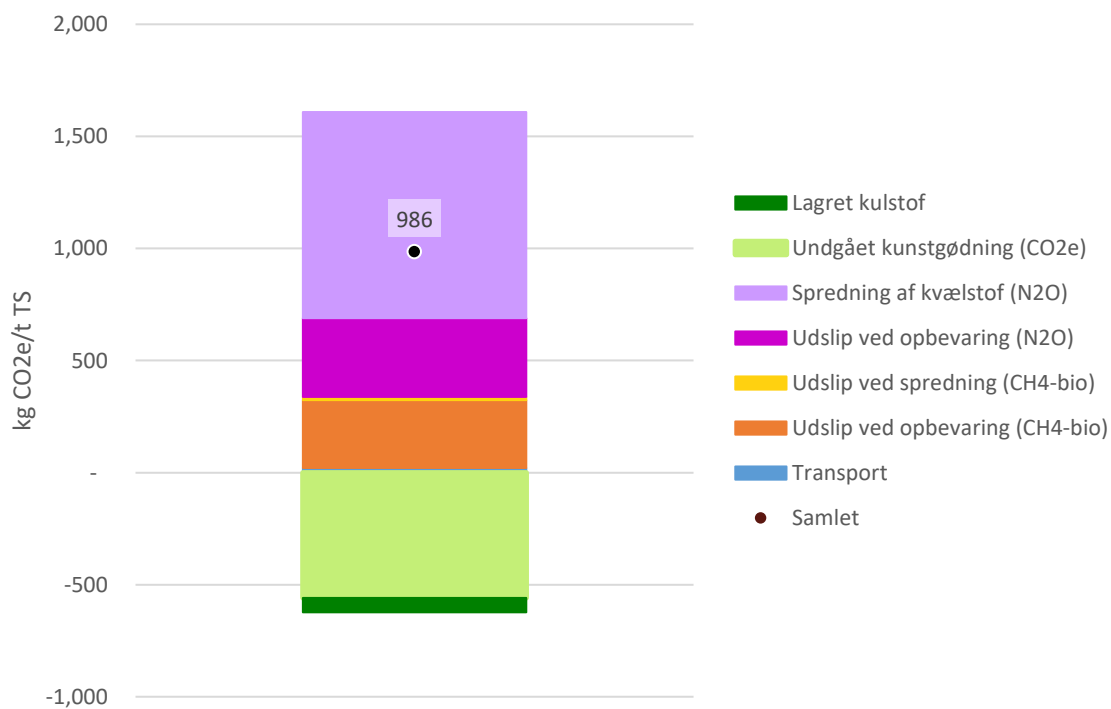
Afvandet slam

Slam fra spildevandsanlæg afvandes for at reducere vandindholdet. Slammet kan spredes på landbrugsjord hvis grænseværdier for tungmetaller overholdes. Analysedata fra slam på Samsø viser at niveauer af tungmetaller ligger under grænseværdierne (Samsø Kommune, 2021). I referencecasen for afvandet slam bliver slammet transporteret væk fra Samsø, opbevaret og derefter spredt på landbrugsjord.



Figur 7: Skitse af referencecase for afvandet slam.

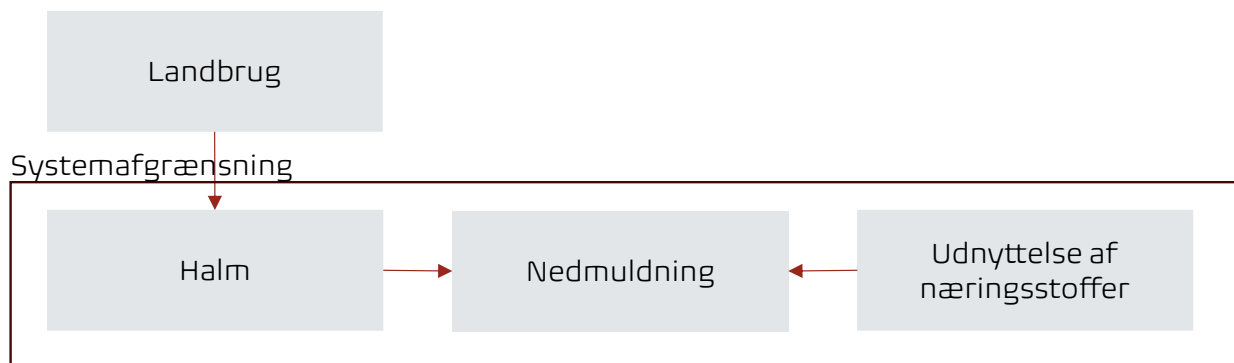
Opbevaring af afvandet slam er den største kilde til drivhusgasemissioner, med væsentlige lattergas og metan-emissioner, som vist i Figur 8. Her modelleres langtidslagring med et lineært gennemsnit over seks måneder. Det regnes med en udledning af 0,4% af N som N_2O og 3% af kulstof som CH_4 baseret på Larsen et al. (2018). Disse er meget følsomme parametre, og især N_2O udslip er forbundet med høj usikkerhed. Uden lattergasemissioner går referencen for slam fra at være positiv til negativ, primært grundet undgåede emissioner fra sparet kunstgødning på grund af høj kvælstofværdi i slam.



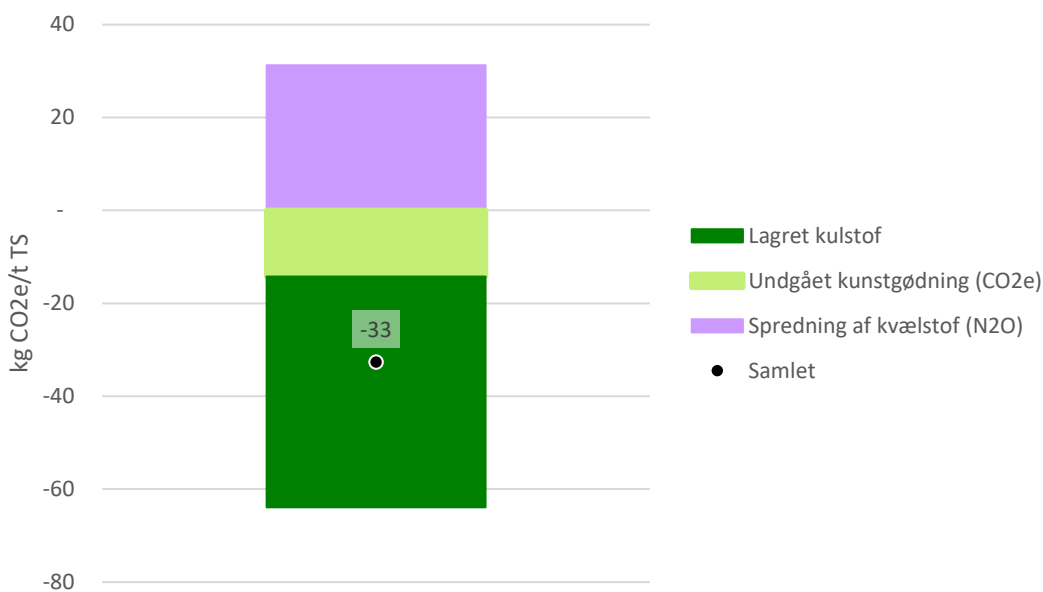
Figur 8: Overblik over drivhusgasemissioner fra referencecasen for afvandet slam opgjort i CO₂e per tons tørstof.

Halm

Referencen for halm er at biomassen nedmuldes i landbrugsjorden hvor en del af næringsstofferne i halmten bliver udnyttet. Denne reference anvendes for både anlægscase 2 og 3 på trods af den store forskel i halmens markedsværdi.



Figur 9: Skitse af referencecase for halm.



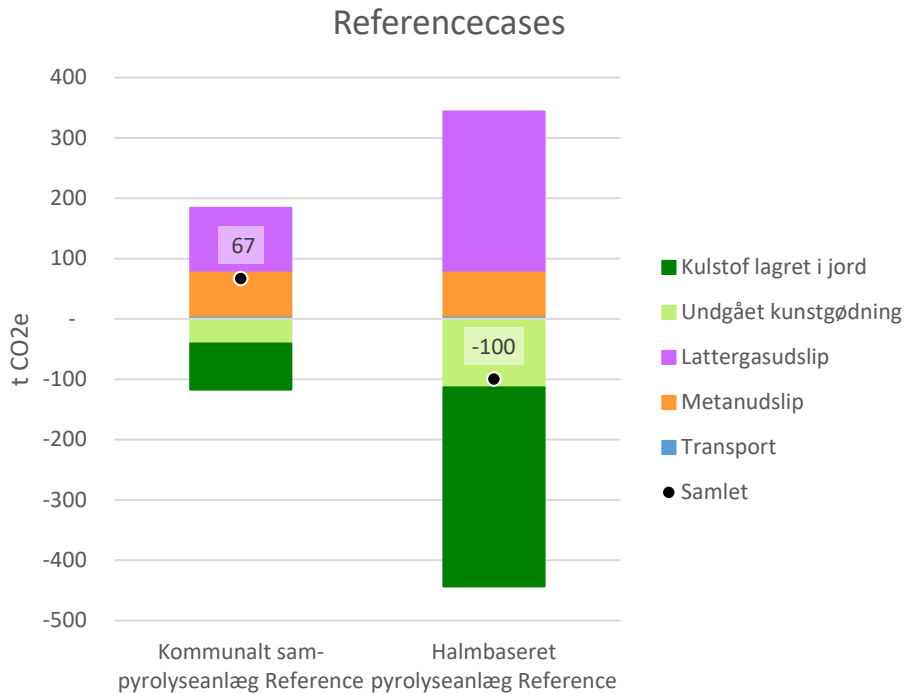
Figur 10: Overblik over drivhusgasemissioner fra referencecasen for halm opgjort i CO₂e per tons tørstof.

Emissioner fra spredning af kvælstof bliver opvejet af lagret kulstof, der resulterer i negative emissioner. Det lagrede kulstof for halm svarer til de 3% af kulstofindholdet der bliver lagret mere end 100 år i jorden ved nedmuldning af halm, specificeret i Tabel 11.

Reference cases samlet

De samlede og vægtede referencer er forskellige for de to pyrolysecases på grund af forskelligt input til pyrolysen, med eller uden halminput. De absolutte tal for kvantificerede drivhusgasemissioner vises i Figur 11. Den største del af opgjorte drivhusgasemissioner stammer fra de kommunalt indsamlede reststrømme, derfor er de samlede emissioner for referencerne opgjort per tons tørstof højere for det kommunale sam-pyrolyseanlæg end for det halmbaserede pyrolyseanlæg. De negative emissioner i referencen for det halmbaserede anlæg stammer fra at referencen for halm er negativ, hvilket gør at der skal flere

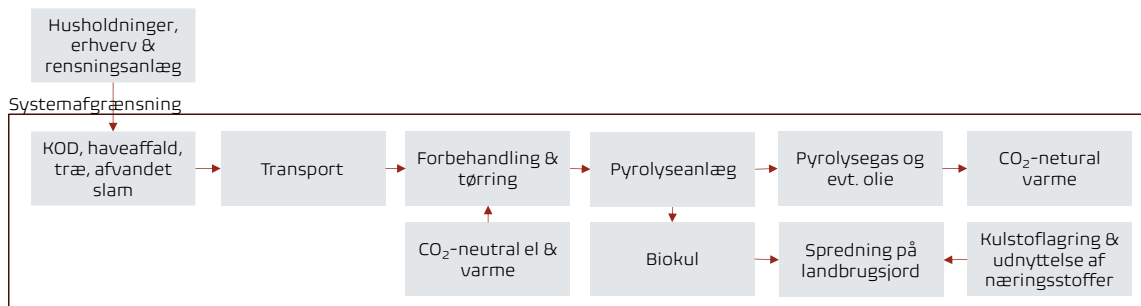
negative emissioner til for at pyrolyse vil give mening fra et klimaperspektiv end hvis halm ikke havde været en del af input mixet.



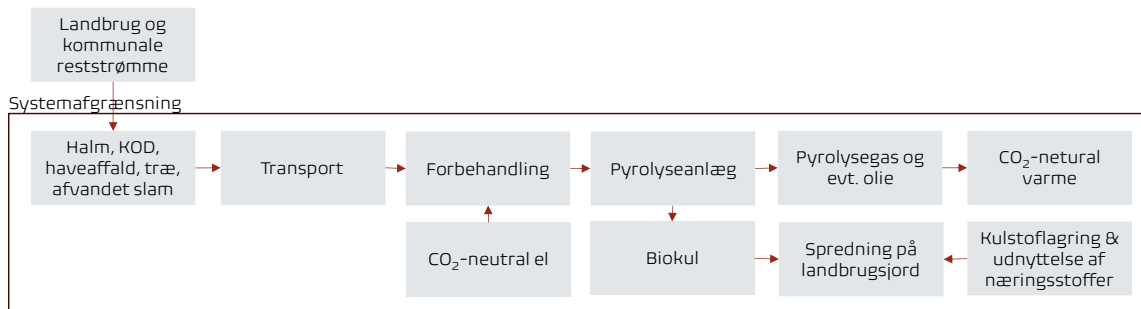
Figur 11: Drivhusgasemissioner for referencen for de to pyrolysecases, ved pyrolyse af hhv. 680 og 5780 t TS.

Pyrolyse cases

Input i de to pyrolysecases er skitseret i Tabel 2 & Tabel 3, hvor de samme kommunalt indsamlede reststrømme bliver behandlet i begge cases, og hvor der i det halmbaserede anlæg er halm der udgør det primære input. Det halmbaserede anlæg er cirka ti gange så stort som det kommunale sam-pyrolyseanlæg, men processerne i de to cases er sammenlignelige, bortset fra behovet for tørring i sam-pyrolysecasen. I begge pyrolysecases antages det at halvdelen af kulstoffet ender i biokulfraktionen.



Figur 12: Skitse over sam-pyrolyse case



Figur 13: Skitse over halmpyrolyse case.



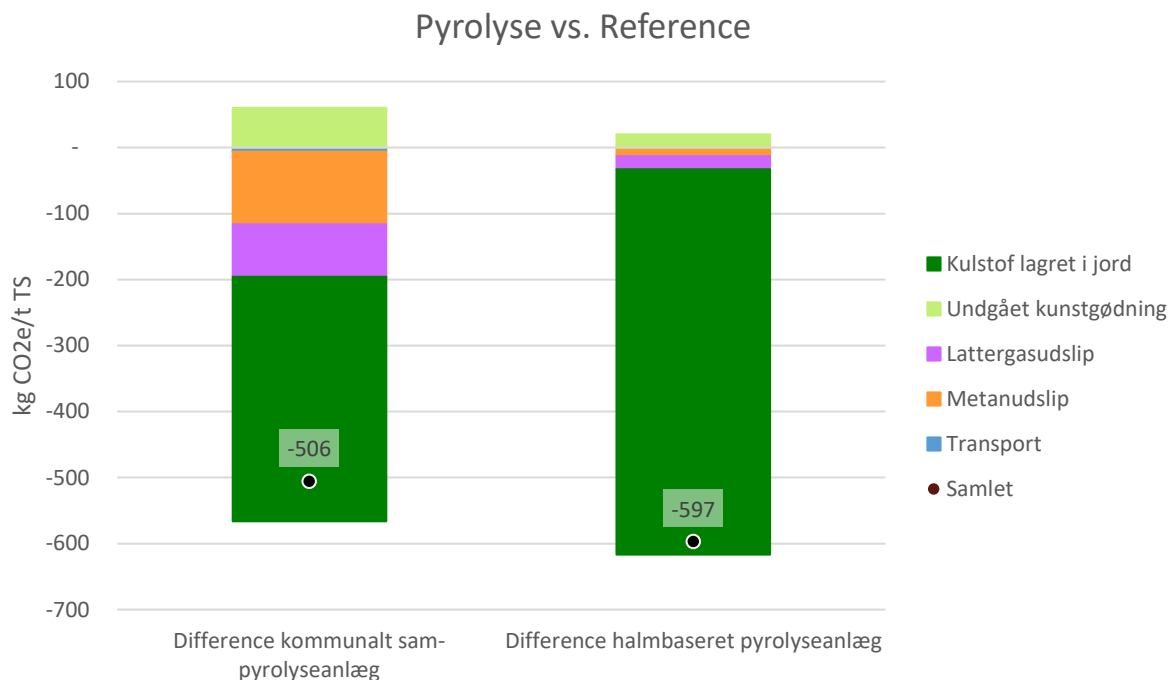
Figur 14: Drivhusgasemissioner for de to pyrolysecases af kommunale reststrømme med og uden halminput.

Inputmixet i de to pyrolysecases er forskelligt, blandt andet med højere andel kvælstof samt lavere andel kulstof i inputmixet for det kommunale sam-pyrolyseanlægget end det halmbaserede anlæg. Dette leder til højere lattergasemissioner fra produktion af kunstgødning i det kommunale sam-pyrolyseanlæg og større mængde kulstof lagret i jord i det halmbaserede pyrolyseanlæg. I begge pyrolysecases stammer emissioner fra kunstgødning fra produktion af kunstgødning svarende til den ikke udnyttede mulighed for at recirkulere kvælstof i samme mængde som i referencen. De to pyrolysecases bør ses i forhold til forskel i input, der er skitseret i Tabel 2 og Tabel 3 og sammenlignes med hver sin reference.

Referencer i forhold til pyrolyse cases

Biokul fra pyrolyse forventes at lagre 80% af kulstoffet, der er i biokullet, i et 100års perspektiv. Kvantificerede lattergasudslip i pyrolysecasen stammer fra brug af kunstgødning, for at substituere den kvælstof der kommer tilbage til jord i reference casen. Dette leder til lattergasudslip, men da der her primært er tale om kvælstofgødning med 100% udnyttelsesfaktor fører dette til mindre total mængde udbragt kvælstof og dermed mindre lattergasemissioner end tilsvarende udslip fra brug af kvælstofgødning i referencen. De samlede drivhusgasemissioner, vist i Figur 15 og Tabel 13, betyder en fordel for pyrolysecasen på -506kg

CO₂e/t TS for det kommunale sam-pyrolyseanlæg samt -597kg CO₂e/t TS input til det halmbaserede pyrolyseanlæg.



Figur 15: Sammenligning mellem reference og pyrolyse cases opgjort i kg CO₂e per tons tørstof.

kg CO ₂ e/t TS	Kommunalt sam-pyrolyseanlæg			Halmbaseret pyrolyseanlæg		
	Reference	Pyrolyse	Difference	Reference	Pyrolyse	Difference
Transport	8	2	-6	1	1	0
Metanudslip	110	-	-110	13	-	-13
Lattergasudslip	153	74	-79	46	26	-20
Fortrængt energi	-	-	-	-	-	-
Undgået kunstgødning	-60	-	60	-20	-	20
Kulstof lagret i jord	-112	-483	-370	-57	-641	-584
Samlet	98	-408	-506	-17	-614	-597
<i>Samlet (uden N₂O)</i>	<i>-55</i>	<i>-481</i>	<i>-427</i>	<i>-63</i>	<i>-640</i>	<i>-577</i>

Tabel 13: Overblik over drivhusgasemissioner i reference og pyrolyse cases.

Den primære forskel mellem reference og pyrolysecasen stammer fra forskel mellem lagring af kulstof, hvilket er et af de primære formål med pyrolysecasen. Lattergasemissioner opgør en stor del af drivhusgasemissionerne i referencecasen. Disse stammer både fra procesemissioner og fra brug af kvælstofgødning. De er forbundet med stor usikkerhed og følsomhed da de er notorisk svære at måle og er potente drivhusgasser. Derfor er det relevant med en følsomhed, der ekskluderer lattergasemissioner. Her bliver emissioner fra referencen for det kommunale sam-pyrolyseanlæg negative, men de er stadigvæk lavere i pyrolysecasen på grund af de store negative emissioner fra lagring af kulstof i jord. I et kortere tidsperspektiv, med GWP₂₀ fremfor GWP₁₀₀, se Tabel 10, fylder metanudslip mere, men forskellen for kulstof

lagret i jord er reduceret mellem reference og pyrolyse cases. Samlet set giver dette en fordel for pyrolyse casen for det kommunale sam-pyrolyseanlæg, hvor metan fylder mere. I det halmbaserede pyrolyseanlæg fylder metan relativt lidt i det samlede billede, men lagret kulstof betydeligt mere. Her betyder den kortere tidshorisont en reduceret forskel for lagret kulstof, hvilket samlet set giver en mindre fordel for pyrolyse-casen.



6. Biokul på landbrugsjord

Der vurderes være gode muligheder for at sprede biokul på landbrugsjord på Samsø, forudsat at grænseværdier for tungmetaller bliver overholdt. Grænseværdier for koncentrationer af tungmetaller er fastsat i affald til jord bekendtgørelsen (Affald til jord-bekendtgørelsen, 2018) både per kg tørstof og per kg fosfor. Disse grænseværdier skal overholdes før spredning af biokul på landbrugsjord bliver relevant.

Indhold af tungmetaller i biokul er både afhængig af input til pyrolysen samt den specifikke pyrolyseproces (Thomsen, 2024). Brugte værdier for indhold af tungmetaller er specificeret i Tabel 14. For afvandet slam stammer data fra analyser af slam i Samsø slambede (Samsø Kommune, 2021). Her antages det at indhold af tungmetaller er det samme for afvandet slam som for slam i slambede. For resterende fraktioner stammer data fra Phyllis2 databasen (Phyllis2, 2024). Denne data er dog forbundet med stor usikkerhed, da der er baseret på gennemsnit af varierende antal studier. Her stikker indhold af nikkel i KOD ud med meget høje værdier. Disse er baserede på et gennemsnit af fire studier med et markant spænd, fra 2 til 413 g Ni/t TS. Dette tyder på at der har været urenheder i noget af den KOD der ligger til grund for dataindrapporteringen. Der er brug for en specifik analyse af de relevante fraktioner på Samsø for et retvisende billede af indhold af tungmetaller.

	Cadmium g Cd/t TS	Chrom g Cr/t TS	Kobber g Cu/t TS	Kviksølv g Hg/t TS	Nikkel g Ni/t TS	Bly g Pb/t TS	Zink g Zn/t TS
KOD	1	99	112	0	151	162	268
Træ	0	10	5	0	4	4	47
Slam afvandet	1		336	1	15	20	740
Halm	0	3	5	0	1	1	23

Tabel 14: Indhold af tungmetaller, gennemsnitsværdier fra Phyllis2 databasen for KOD, træ og halm. For afvandet slam er data fra Samsø Kommune, 2021. Her antages at indhold af tungmetaller er de samme for afvandet slam som fra slambede.

Med de brugte værdier for tungmetaller i Tabel 14 og en antagelse om at cadmium fordampes 85%, kviksølv 100% og bly 10%, fra et testanlæg med procestemperatur på 650°C (Samsø Kommune, 2021), og det resterende bliver opkoncentreret i biokullet med 0,5 kg TS biokul/kg TS input overholdes grænseværdier for nikkel for det kommunale sam-pyrolyseanlæg ikke og niveauerne er også over grænseværdien for nikkel per kg fosfor for begge pyrolysecases. Den høje koncentration af nikkel stammer primært fra KOD, hvilket er forbundet med høj usikkerhed. Hvis der også ses tilsvarende høje værdier af tungmetaller i KOD fra Samsø betyder dette at grænseværdierne for nikkel ikke ville blive overholdt, som vist i Tabel 15, der viser en sammenligning mellem grænseværdier og de beregnede koncentrationer ved et input miks der svarer til Tabel 2.

	Cadmium	Chrom	Kobber	Kviksølv	Nikkel	Bly	Zink
Grænseværdi (mg/kg TS)	0,8	100	1000	0,8	30	120	4000
Estimeret biokul Kommunalt sam-pyro- lyseanlæg (mg/kg TS)	0	69	343	-	113	111	784
Estimeret biokul Halmbaseret pyrolyse- anlæg (mg/kg TS)	0	14	52	-	16	14	141
	Cadmium	Chrom	Kobber	Kviksølv	Nikkel	Bly	Zink
Grænseværdi (mg/kg P)	100			200	2500	10000	
Estimeret biokul Kommunalt sam-pyro- lyseanlæg (mg/kg P)	9			0	5643	5554	
Estimeret biokul Halmbaseret pyrolyse- anlæg (mg/kg P)	16			0	3776	3404	

Tabel 15: Overblik over grænseværdier for tungmetaller i biokul til spredning på landbrugsjord samt estimerede koncentrationer.

Det er afgørende for relevansen at sprede biokul på landbrugsjord at grænseværdier for tungmetaller overholdes. Forudsat at de bliver overholdt må landbrugsjord efter affald-til-jord bekendtgørelsen tilføres maksimalt 7 tons TS biokul/ha/år, beregnet som et gennemsnit over 10 år (SEGES, 2023). Med de to

skitserede pyrolyseanlæg ville der være brug for hhv. cirka 50 og 350 ha årligt for spredning af biokul, hvilket ses som fuldt realistisk på Samsø, der har 8000 ha landbrugsjord og gartneri, igen forudsat at grænseværdier for tungmetaller bliver overholdt

Kommentarer fra Henrik Øster Samsø Landbrugsforening:

- *Der er gode muligheder for spredning af biokul, men dette er betinget af at der en fornuftig businesscase for landmændene. Herudover er det afgørende at grænseværdier for tungmetaller bliver overholdt.*
- *Der ses umiddelbart ikke nogen arealbegrænsning for spredning af biokul på landbrugsjord på Samsø, her er der estimeret at der er brug for 600 ha for spredning af biokul årligt.*





7. Drivhusgasemissioner

I analysen er drivhusgasemissioner samt lagring af biogent kulstof beregnet i et 100 års tidsperspektiv, vist for de to anlæg i Tabel 16. En mere detaljeret analyse med årlig tidsopløsning er nødvendig for at vurdere hvornår specifikke klimagevinster optræder. For lagring af kulstof kan der ved flere af referencerne være en initial periode hvor referencen er fordelagtig i forhold til pyrolysecasen. Der er brug for specifikke henfaldskurver for lagring af kulstof for referencer for forskelligt input samt henfaldskurver for kulstofslagring for den producerede biokul for at kunne beregne skæringspunktet for pyrolysecases.

t CO ₂ e/år	Kommunalt sam-pyrolyseanlæg			Halmbaseret pyrolyseanlæg		
	Reference	Pyrolyse	Difference	Reference	Pyrolyse	Difference
Transport	5	1	-4	5	6	1
Metanudslip	75	-	-75	75	-	-75
Lattergasudslip	104	50	-54	263	150	-114
Fortrængt energi	-	-	-	-	-	-
Undgået kunstgødning	-41	-	41	-113	-	113
Kulstof lagret i jord	-76	-328	-252	-330	-3,707	-3,377
Samlet	67	-277	-344	-100	-3,551	-3,451
<i>Samlet (uden N₂O)</i>	-37	-327	-290	-363	-3,700	-3,337

Tabel 16: Overblik over samlede drivhusgasemissioner per år og anlæg i 100 års perspektiv.

Der er lavet overslagsberegninger for et 20 års tidsperspektiv. Her fylder metanudslip mere da det er en mere potent drivhusgas i et kortere tidsperspektiv. Derimod er forskellen mellem reference og pyrolysecasen når det gælder lagring af kulstof reduceret. I det samlede billede bliver der en større forskel til fordel for pyrolysen for det skitserede lille sam-pyrolyseanlæg i forhold til referencen med et 20 årigt tidsperspektiv grundet de høje metanudledninger i reference casen. For det store halmbaserede anlæg er der derimod en noget reduceret fordel ved pyrolyse casen med et 20 årigt tidsperspektiv da der er en reduceret forskel mellem reference og pyrolyse casen. Disse forskelle forventes begge at være endnu mere udtalt på en endnu kortere tidshorisont hvor karakteriseringsfaktoren på metan er endnu højere og der vil være end større andel af halm-kulstof tilbage i jorden.

For lagring af kulstof fra biokul er den samme antagelse på 80% lagret kulstof i biokul brugt i begge pyrolysecases. Dette er dog forbundet med usikkerhed da den specifikke stabilitet afhænger af input, pyrolyseproces og anvendelsesforhold. I en videre analyse bør der derfor gøres en specifik vurdering af stabiliteten af de forskellige typer af biokul. Ved spredning af biokul på jord er det afgørende at grænseværdier for tungmetaller bliver overholdt. Relevansen for et pyrolyseanlæg på Samsø er derfor afhængig af specifikke analyse af tungmetaller i input til et pyrolyseanlæg og videre i produceret biokul.

De høje omkostninger for pyrolysecasen svarer til en fortrængningsomkostning på omkring 4400 kr./ton CO_{2e} for det kommunale sam-pyrolyseanlæg og omkring 1300 til 2300 kr./ton CO_{2e} for det store halmbaserede anlæg afhængig af prisen på halm.

Referencer

Affald til jord-bekendtgørelsen, 2018. (BEK nr 1001 af 27/06/2018) Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2018/1001>

Andersen, M.N. et al., 2024. Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget - 2024. Rådgivningsrapport fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet. https://pure.au.dk/portal/files/380624507/Klimavirkemiddelkataloget_2024_inkl._boblerlisten_10.06.2024.pdf

Biogas Danmark, 2024. <https://www.biogas.dk/fakta/metanudslip/>

Bruun, S. et al., 2016. Estimation of long-term environmental inventory factors associated with land application of sewage sludge. Vol. Journal of Cleaner Production. Vol 126 (2016) 440-450. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.081>

Bæredygtighedsbekendtgørelsen, 2024. (BEK nr 530 af 28/05/2024) Bekendtgørelse om bæredygtighed og besparelse af drivhusgasemissioner for biomassebrændsler og flydende biobrændsler til energiformål, m.v. <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2024/530>

Energistyrelsen, 2019. Emissionsfaktorer for vejtransporten (pr. km.) https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/emissionsfaktorer_for_vejtransporten_pr._km.pdf

Energistyrelsen, 2023. Analyseforudsætninger til Energinet. <https://ens.dk/service/fremskrivninger-analyser-modeller/analyseforudsætninger-til-energinet>

Energistyrelsen, 2024a. Technology Data for Renewable Fuels - Version 0012. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_for_renewable_fuels.pdf

Energistyrelsen 2024b. Standardfaktorer for brændværdier og CO2emissionsfaktorer til brug for rapporteringsåret 2023. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/CO2/energistyrelsens_standardfaktorer_for_2023.pdf

Griffin People ApS, 2019. Gasification Biocombine Forprojekt.

Gødskningsbekendtgørelsen, 2023. (BEK nr 1060 af 26/07/2023) Bekendtgørelse om jordbrugets anvendelse af gødning i planperioden 2023/2024. <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2023/1060>

IPCC, 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 11: N2O Emissions from Managed Soils, and CO2 Emissions from Lime and Urea Application. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch11_Soils_N2O_CO2.pdf

IPCC, 2021. Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang, 2021: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054, doi: 10.1017/9781009157896.009.

Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, 2024. Klimastatus og -fremskrivning 2024 Kapitel 23 El og fjernvarme. <https://www.kefm.dk/Media/638557749294492439/KF24%20Kapitel%2023%20El%20og%20jernvarme.pdf>

Klimarådet, 2020. <https://klimaraadet.dk/da/virkemiddel/krav-til-udslip-fra-biogasanlaeg>

Larsen, J. et al., 2018. Life cycle assessment comparing the treatment of surplus activated sludge in a sludge treatment reed bed system with mechanical treatment on centrifuge. *Journal of Cleaner Production*. Vol 185 (2018) 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.193>

Miljøstyrelsen, 2019. Kildesorteret organisk dagrenovation (KOD) Business Case med miljømæssige og økonomiske konsekvenser. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2019/07/978-87-7038-087-4.pdf>

Miljøstyrelsen, 2023a. Affaldsfremskrivning. <https://mst.dk/erhverv/groen-produktion-og-affald/affald-og-genanvendelse/affaldshaandtering/affaldsdata-og-affaldsdatasystemet/affaldsfremskrivning>

Miljøstyrelsen, 2023b. Reduktion af klimagasser fra behandling af haveaffald. Del 3: Alternative teknologier til behandling af have-affald i Danmark. Miljøprojekt nr. 2233. Januar 2023

Miljøstyrelsen, 2023c. Bilagsrapport Reduktion af klimagasser fra behandling af haveaffald. Afrapportering af klimaberegninger. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2023/02/Bilagsrapport.pdf>

Phyllis2, 2024. Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar. <https://phyllis.nl/>

Rodrigues, L., et al., 2023. The importance of biochar quality and pyrolysis yield for soil carbon sequestration in practice. *European Journal of Soil Science*. Vol. 74 (4). <https://doi.org/10.1111/ejss.13396>

Samsø Kommune, 2021. AquaGreen Forprojektrapport 210331-001

SEGES, 2023. VEJLEDNING I ANVENDELSE AF BIOKUL PÅ LANDBRUGSJORD https://www.landbrugsinfo.dk/-/media/landbrugsinfo/Public/D/9/7/vejledning_anvendelse_biokul_landbrugsjord.pdf

Symeonidis, A., 2016. Market for inorganic nitrogen fertiliser, as N, Denmark, Consequential,ecoinvent database version 3.8. in Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), pp.1218–1230

ten Hoeve, M. et al., 2019. Life cycle assessment of garden waste management options including long-term emissions after land application, *Waste Management*, Vol. 86, p. 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.005>

Thomsen, T. P., 2024. Anvendelse af biokul fra LT-CFB anlæg som gødningssubstrat.

Wolf, D., Lehmann, J., Ogle, S., Kishimoto-Mo, A. W., McConkey, B., & Baldock, J., 2021. Greenhouse Gas Inventory Model for Biochar Additions to Soil. *Environmental Science and Technology*, 55(21), 14795–14805. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02425>

